

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ENTRE BETÕES DE DISTINTA CLASSE DE RESISTÊNCIA



E. BONALDO
Aluno de Doutoramento
Universidade do Minho
Guimarães



J. A. O. BARROS
Prof. Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães



P. B. LOURENÇO
Prof. Associado
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

O incremento do momento flector resistente que a técnica de reforço baseada na fixação de laminados de CFRP no betão de recobrimento de estruturas laminares de betão armado, por vezes, fica limitado pela extensão máxima de compressão aplicável ao betão. Nestes casos, a conjugação deste sistema de reforço com a aplicação de uma camada de compressão de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) permite aumentar significativamente a resistência à flexão deste tipo de estruturas. Este trabalho é dedicado ao estudo da ligação entre camada de BRFA e o betão da estrutura a reforçar.

1. INTRODUÇÃO

Em estudo anterior [1] verificou-se que o incremento do momento resistente da secção de uma estrutura laminar de betão armado, por aplicação de laminados de fibras de carbono (CFRP), pode ficar limitado pela extensão máxima de compressão aplicável ao betão da superfície superior dessa estrutura. A investigação numérica desenvolvida no âmbito desse trabalho permitiu constatar que, pela aplicação de uma camada de compressão de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) era possível aumentar significativamente o momento resistente com elevada rentabilidade do CFRP. A utilização de BRFA na construção da referida camada tem, quando comparado com o betão simples (BS), dupla vantagem: evita a ocorrência de fendilhação por retracção e variação de temperatura [2] dado que o BRFA tem resistência residual à tracção mais elevada; evita-se a queda brusca de resistência logo após a entrada na fase de amolecimento por compressão do betão.

No dimensionamento do reforço admite-se, geralmente, que a nova camada e a laje existente constituem uma estrutura monolítica, sem possibilidade de qualquer separação entre elas. Esta ligação é geralmente efectuada por intermédio de adesivos à base de resinas epóxi, pelo que reside na qualidade da ligação assegurada por estes materiais o maior ou menor erro cometido na referida hipótese de monolitismo entre a nova camada e o substrato do betão da estrutura existente.

O presente trabalho trata especificamente da ligação entre BRFA e betão antigo. A influência da classe de resistência, quer do betão da base como da camada de reforço foi analisada por intermédio de ensaios de arrancamento por tracção (*pull-off test*). O desempenho de três tipos de adesivos epóxi foi analisado.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente trabalho são investigados os efeitos da resistência do betão da base e da camada de reforço em BRFA na resistência da ligação. É avaliado também o desempenho de três adesivos epóxi na resistência da ligação entre a camada de BRFA e o substrato de betão simples. O programa experimental era constituído por 3 séries de betão da base, com distintas classes de resistência. Para cada uma destas séries foram adoptadas duas séries com duas classes diferentes de resistência para a camada de reforço resultando um total de seis séries (Tabela 1). Maiores detalhes sobre o programa experimental podem ser obtidos em [3].

Tabela 1 - Classes de resistência dos betões utilizados no programa experimental.

Betão da base (BS)	Betão da camada de BRFA
C20/30	C20/30
	C30/40
C40/50	C40/50
	C50/60
C60/70	C60/70
	C65/75

2.1 Betão do substrato e da camada de BRFA

No fabrico de cada betão foram utilizados agregados disponíveis na região do Minho. Para a definição das composições foi utilizado o método de Faury [4]. Os BRFA foram reforçados com fibras metálicas Dramix[®], comercialmente designadas por RC-80/60-BN [5]. Este tipo de fibra tem-se mostrado eficaz no aumento da capacidade última de elementos de betão [6,7]. Na Tabela 2 são apresentados valores médios de resistência à compressão do betão da base e da camada de reforço. As camadas C1 a C6 foram aplicadas sobre superfície da base em estado seco. Por sua vez, as camadas C1' a C5' foram aplicadas sobre superfície da base em estado saturado.

Tabela 2 - Resistência à compressão média⁽¹⁾ das composições (em MPa).

Base (BS)	B1		B2		B3	
	22.32		42.59		60.82	
Camada (BRFA)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	25.87	32.08	41.50	53.51	62.54	66.81
	C1'	C2'	C3'	C4'	C5'	C6'
	27.36	38.48	58.46	66.67	61.78	

⁽¹⁾ valor médio de 3 provetes cilíndricos (150 mm x 300 mm), aos 28 dias

2.2 Ligantes

Foram seleccionados 3 adesivos para ligar a camada de BRFA fresco ao substrato de betão simples, nomeadamente dois agentes de aderência à base de resinas de epóxi com a designação comercial: Icosit[®] K101 e Sikadur[®] 32N (P1 e P2, respectivamente); e um agente de aderência à base de cimento e resina de epóxi modificada designado comercialmente por: Sikatop[®] Armatec 110 EpoCem (P3) [8]. O adesivo P3 foi aplicado sobre a superfície da base em estado seco e em estado saturado.

2.3 Preparação dos provetes

Lajes em betão simples com dimensões de 300 mm x 650 mm, e ~80 mm de espessura foram usadas como substrato. Quando o betão do substrato atingiu a idade de 28 dias procedeu-se ao tratamento da superfície (Figura 1) e à colagem da camada de BRFA de ~30 mm de espessura (Figura 2).

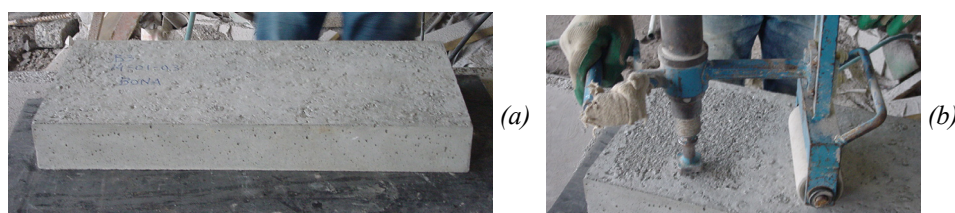


Figura 1: Superfície da laje antes de ter sido bujardada (a) e martelo de bujardar (b).

Nos trabalhos de colagem foram seguidas as recomendações do fabricante [8], bem como as directivas do ACI [9,10,11,12]. Na Figura 2 são ilustradas as principais etapas do processo de ligação da camada de BRFA ao betão do substrato. Na compactação da camada fina de BRFA foi empregada uma placa acoplada a um vibrador de agulha, de modo a simular as condições reais em obra (Figura 2 (g)). Quando o betão da camada de reforço atingiu idade de cerca de 28 dias foram efectuadas carotagens parciais e realizados os ensaios de *pull-off*.

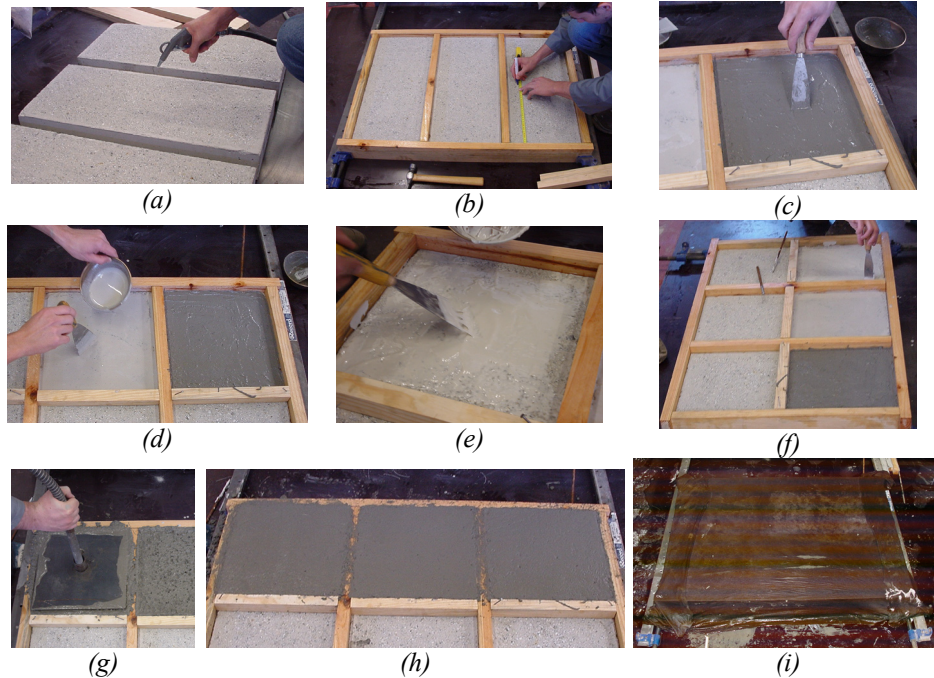


Figura 2: Principais passos do processo de colagem: (a) limpeza da superfície com jacto de ar comprimido, (b) definição da área de cada produto, (c) colocação do agente P3, (d) colocação do agente P2, (e) colocação do agente P1, (f) visão geral antes da colocação do BRFA, (g) compactação do BRFA, (h) aspecto final, (i) cura.

2.4 Ensaio de *pull-off* e equipamento

O princípio do ensaio de *pull-off* consiste em aplicar uma força predominantemente de tracção (F_T) no sistema composto pela camada de reforço ligada ao betão de substrato. Trata-se de um ensaio simples e usual na avaliação da capacidade de aderência de revestimentos e materiais de reparações [13-19]. No caso da camada de reforço ser em betão, executa-se uma carotagem parcial do mesmo de modo a mobilizar a zona de ligação substrato-reparação (Figura 3).

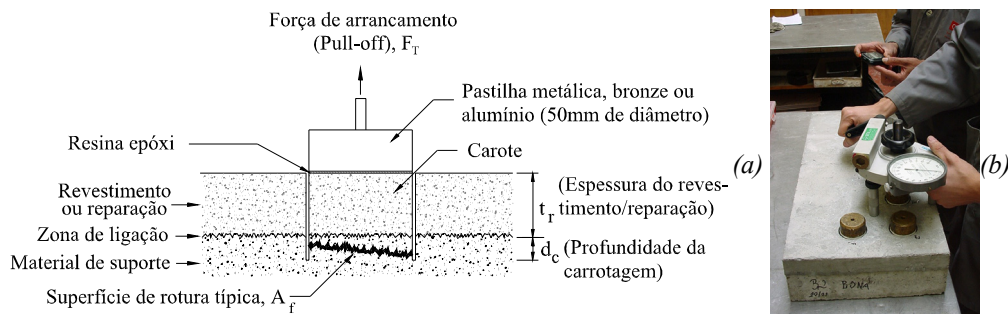


Figure 3: Representação esquemática do ensaio de *pull-off* (a), e execução do ensaio (b).

Na Figura 3(b) é apresentado o equipamento empregado nos ensaios. Trata-se de um aparelho de arrancamento Proceq DYNA Z15, com disco em bronze de 48 mm de diâmetro. Para se ter um entendimento mais apurado do que realmente foi medido, após a realização dos ensaios, foi realizado uma descrição detalhada da superfície de fractura. Na execução dos ensaios foram seguidas as directrizes presentes em [16-20].

3. RESULTADOS

Valores médios de resistência de arrancamento de quatro ensaios, para todas as séries, estão apresentados na Figura 4. Note-se que não houve aumento da resistência de *pull-off* pelo aumento da resistência da camada de BRFA. A resistência do betão da base é quem governa a resistência de arrancamento. Dos resultados experimentais é também possível verificar que, tendo por comparação os resultados obtidos com os produtos P1 e P2, a resistência de arrancamento para o produto P3 foi relativamente baixa, concluindo-se que o produto de ligação influencia significativamente nos resultados de arrancamento. O ligante P2 foi o que proporcionou maiores valores de resistência de *pull-off*, independentemente da resistência à compressão da base e da camada de BRFA (Figura 5). Na Tabela 3 são ilustradas as secções de rotura típicas observadas após os ensaios.

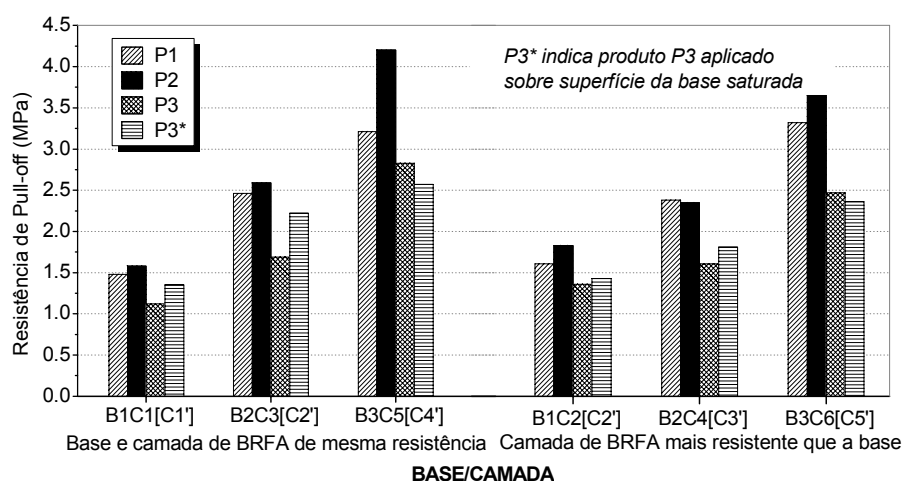


Figura 4: Resistência média de *pull-off* para cada tipo de base e camada de BRFA.

Para os casos de betão da base de baixa e média resistência (B1C1', B1C2, B2C2' e B2C3') verifica-se um benefício marginal quando o ligante P3 é aplicado sobre a superfície da base saturada. Já para os casos de bases de alta resistência (B3C4' e B3C5'), foi observada uma redução na resistência de *pull-off* (Figura 4 e 5). O betão da base destas séries foi o de classe de maior resistência, e por ser mais denso, este tipo de betão ofereceu maior resistência à penetração da água usada na saturação da superfície. Como resultado, houve a formação de uma película de água que diminuiu a resistência da ligação entre os dois materiais. As análises comparativas entre o desempenho dos produtos, baseadas na resistência média de *pull-off*, demonstram que a resistência de arrancamento obtida com o produto P2 é 1.11 e 1.46 (1.36)

vezes maior que a resistência de arrancamento obtida com o produto P1 e P3 (e P3 sobre superfície saturada), respectivamente. Verifica-se também que há um aumento na relação resistência de *pull-off* / custo com o aumento da resistência do betão da base, para os três tipos de ligantes (Figura 6). Assim, o betão da base tem papel preponderante na resposta do ensaio de arrancamento. Para a base mais resistente, o desempenho é duas vezes maior do que o registado na base mais fraca. O ligante P2 apresentou melhor relação resistência de arrancamento / custo, independentemente da resistência da base e da camada de BRFA (Figura 6).

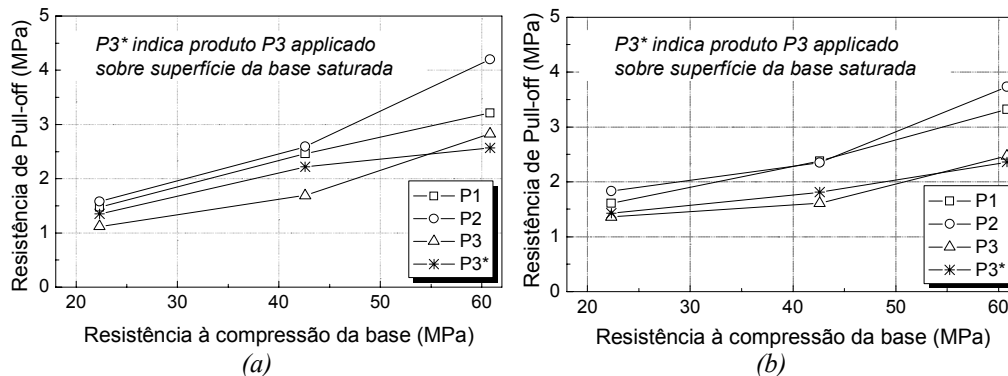


Figura 5: Camada de BRFA e base de mesma resistência à compressão (a), e camada de BRFA mais resistente que a base (b).

Tabela 3 - Secções de fractura típicas detectadas nos ensaios para cada ligante e tipo de base.

P1 e P2		P3		P3*
B1 e B2	B3	B1, B2 e B3	B1, B2 e B3	B1, B2 e B3

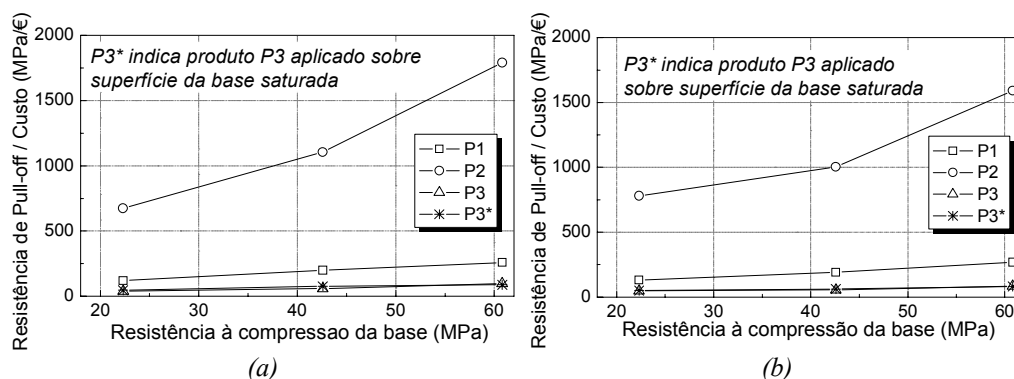


Figura 6: Relação desempenho / custo para (a) camada de BRFA e base com mesma resistência, e (b) camada de BRFA mais resistente que a base.

4. CONCLUSÕES

Todos os ligantes apresentaram valores médios de resistência de *pull-off* superiores a 1.12 MPa. Para substratos em betão de baixa e média resistência, ligados com os agentes P1 e P2, houve tendência de ruptura no betão da base. Isto indica que, nestes casos, o betão da base é a parte mais fraca no sistema de reforço, e a resistência de *pull-off* está associada à resistência à tracção do betão da base.

Os materiais ligantes P1 e P2 proporcionaram boa ligação da camada fina de BRFA à base de betão simples. E para as bases B1 e B2, a resistência à tracção da camada foi superior a resistência à tracção da base, uma vez que a superfície de rotura se desenvolveu no betão do substrato. Em algumas secções de rotura, próxima da zona de colagem, foi detectada a presença de vazios e distribuição não uniforme das fibras metálicas, o que sugere atenção adicional na colocação e consolidação do BRFA.

A forma, diâmetro máximo e resistência dos agregados grossos parece ter influência significativa na resistência de *pull-off*, uma vez que para os substratos de baixa e média resistência, a superfície de fractura desenvolveu-se pela zona de interface agregado-pasta de cimento, enquanto que nos substratos de alta resistência os agregados graúdos foram seccionados pela superfície de fractura.

Em geral, a secção de fractura ficou localizada no topo da base, ligeiramente abaixo do produto de ligação. Este comportamento é explicado pela baixa resistência da superfície da base. Provavelmente, os procedimentos adoptados na preparação desta zona (bujardagem) causaram danos na mesma, contribuindo para a diminuição da resistência desta zona;

O ligante P2 foi o que proporcionou os valores mais altos de resistência de *pull-off* e, também foi o que se mostrou mais económico, pelo que é o produto mais indicado para este tipo de aplicação.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), pela Bolsa de Doutoramento *SFRH/BD/11232/2002*. Apresentam-se também agradecimentos às empresas “Companhia Geral de Cal e Cimento S.A. (SECIL)”, Sika S.A., “Central do Pego”, “Pedreiras Bezerras”, Bekaert NV, “Bettor MBT Portugal Produtos Químicos para Construção S.A.”. Agradece-se ainda o apoio prestado pelos técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M., “Strengthening a prestressed concrete slab by epoxy-bonded FRP composites and SFRC overlayer”, em *7th Internacional Conference on*

- Inspection Appraisal Repairs & Maintenance of Buildings & Structures*, Nottingham Trent University, UK, 11-13 September 2001.
- [2] Chausson, H.; Granju, J.-L. – “Rechargements minces adhérents en béton renforcé de fibres métalliques - Metal fiber reinforced concrete thin bonded overlays” em *Revue Française de Génie Civil*, N°02, 1997, p. 309-326.
- [3] Bonaldo *et al.* – “Bond characterization between concrete base and repairing SFRC by pull-off tests”, *Report 04-DEC/E-13*, May, 2004, 57 p.
- [4] Coutinho, A.S. – *Fabrico e Propriedades do Betão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988, 3 volumes.
- [5] DRAMIX. – *Product data sheet*, N. V. Bekaert S.A., 1998.
- [6] Barros, J. A. O.; Figueiras, J. A. – “Experimental behaviour of fibre concrete slabs on soil”, *Journal Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1998, Vol. 3, p. 277-290.
- [7] Barros, J. A. O. – *Comportamento do Betão Reforçado com Fibras – Análise Experimental e Simulação Numérica*, Tese de Doutoramentos, 1995.
- [8] Sika. – *Prontuário: catálogo de fichas técnicas*, Sika S.A., 2002, Ed. N° 5, 434 p.
- [9] ACI 503R – “Use of epoxy compounds with concrete”, *ACI Manual of Concrete Practice*, 1993, Part 5, Reported by Committee 503, 28 p., (Reapproved 1998).
- [10] ACI 503.2 – “Standard specification for bonding plastic concrete to hardened concrete with a multi-component epoxy adhesive”, *ACI Manual of Concrete Practice*, 1992, Part 5, Reported by Committee 503, 5 p., (Reapproved 1997).
- [11] ACI 503.5R – “Guide for the selection of polymer adhesives with concrete”, *ACI Manual of Concrete Practice*, 1997, Part 5, Reported by Committee 503, 4 p.
- [12] ACI 503.6R – “Guide for the application of epoxy and latex adhesives for bonding freshly mixed and hardened concretes”, *ACI Manual of Concrete Practice*, 1992, Part 5, Reported by Committee 503, 16 p., (Reapproved 1997).
- [13] Knab, L. I. – “Factors related to the performance of concrete repair materials”, *Technical Report REMR-CS-12*, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, Mar., 1988, 71 p.
- [14] Delatte, N.; Sehdev, A. – “Mechanical properties and durability of BCO and UTW concrete”, em *Annual Meeting of the TRB*, 82th, Washington D.C., Jan., 2003.
- [15] FHA - Federal Highway Administration. – “Tensile bond strength of a high performance concrete bridge deck overlay”, Project # 9904, U.S. Department of Transportation, 1999.
- [16] Austin *et al.* – “Tensile bond testing of concrete repairs”, *Materials and Structures*, 1995, Vol. 28, p. 249-259.
- [17] Vaysburd, A M.; Macdonald, J E. – “An evaluation of equipment and procedures for tensile bond testing of concrete repairs”, *Technical Report REMR-CS-61*, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, Jun., 1999, 84 p.
- [18] BS EN 1542 – “Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-off”, *European Standard*, 1999, BSI, London, 8 p.
- [19] LNEC FE-Pa36 – “Revestimentos de paredes – ensaio de arrancamento por tracção”, *Ficha de Ensaio*, 1986, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 3 p.
- [20] ASTM D4541 – *Standard test method for pull-off strength of coating using portable adhesion testers*, 2002, American Society for Testing and Materials, 13 p.